

KONAN UNIVERSITY

3次元形状のテンプレートマッチングによる顔認証システム

著者	日高 正博, 田中 雅博
雑誌名	甲南大学紀要. 理工学編
巻	52
号	1
ページ	17-34
発行年	2005-07-31
URL	http://doi.org/10.14990/00000086

3次元形状のテンプレートマッチング による顔認証システム

日高 正博¹、田中 雅博²

¹ 甲南大学大学院自然科学研究科

² 甲南大学理工学部・知的情報通信研究所

(受理日 2005年4月1日)

概要

This paper proposes a face authentication method using three dimensional polygon data without color and/or gray level information. The polygon data is obtained by contactless laser 3D digitizer. The recognition method is based on template matching. We developed a robust matching method including pose calibrations as well as the template that is suitable for our method. Experimental result shows a good performance even for the discrimination of twin brothers.

Keywords: Personal identification, 3D data, polygon, pattern matching.

1 はじめに

鍵やカードなどによる持ち物、あるいは、パスワードや暗証番号などの記憶情報に基づく個人認証は、なくしたり忘れてしまう可能性があるだけでなく、他人に容易に渡ってしまうという欠点も持ち合わせており、真に個人の認証が必要な場面では、個人の身体的特徴をそのまま認証に利用するバイオメトリック[3,4,5,6]の重要性が高まってきている。その中でも、顔認証は最も重要な認証方法の1つである[8]。というのは、顔による個人認証は普段から我々人間が無意識のうちにしている認証方法であるからである。さらに、顔認証は、利用者が意識・協力することなく非接触で入力できるため、指紋や指静脈などの認証では使えないような場面でも使える他、精神的および肉体的に、比較的拘束されないという特徴がある。

顔による個人認証はカメラを用いた2次元データを使った認証が中心であるが、近年、3次元データを用いた顔の認証[11]では3次元計測した点データを扱ったもの[9]や顔領域の法線ベクトル及び濃淡情報を利用したもの[10]等がある。しかし、3Dデジタイザによる距離データを、ちょうどお面を重ねるようにして比較するという手法はあまり試みられていない。

本論文では、この手法についての、基礎的研究を行う。顔の凹凸を用いた認証ができれば、化粧などによる変化に強く、また、暗いところでも認証可能な新しい認証手法となることが期待できると思われる。

2 テンプレートマッチング

本研究で利用するマッチング手法はテンプレートマッチングである。3次元データでの評価方法、顔以外のノイズの削除手順、テンプレートマッチングを行う前の位置合わせについて説明する。

2.1 データ

本研究で利用する3次元データの取得方法、取得した3次元データの保存形式、および実験の入力に用いた顔データの構成について説明する。

3次元データの取得にはコニカミノルタ（旧ミノルタ）の非接触式レーザースキャナである3Dデジタイザ“VIVID 300”を用いた。また、ホストコンピュータにはWindows NTを搭載したPC/AT互換機を用いた。

本研究で利用する3次元データのフォーマットはDXF形式[1]である。データは3DデジタイザのCCDカメラ受光部を原点とした右手座標系で表されている。カメラ受光部が原点のためZ軸のみが常にマイナス値であり、このZ座標の絶対値は3Dデジタイザと対象点との距離にあたる。

VIVID 300を高さ70cmの机の上に置き、機器より約0.8～1.2mの距離にある椅子に座った対象者から顔データを取得する。このとき、3次元データには顔のほか、首や髪、衣服なども同時に取り込まれる。我々が用いるのは、網目状に分布する3次元の点の座標集合で、図1はその3次元データを3Dビューワで確認したものである。図2は、参考までに、そのときの写真を示している。また、図1と図2を見比べてみると、3Dデータでは髪や首が欠けていることが分かるように機器の入力範囲内の対象物を完全に取り込めるわけではない。また衣服のシワや襟、首など対象物の変化が大きい場所においてもデータを得ることができない。これは使用しているユーティリティソフトウェアVI-S1が自動的に変化が大きい部分について何らかの処理を加えているものと思われる。



図1: 3次元データを画像化したもの



図2: 写真画像（参考）

2.2 顔部分の抽出

テンプレートは顔データのみで構成する。本論文では判定対象1人あたり1つのテンプレートを用いている。これは短期的に見て顔が複数のテンプレートを必要とするほど変化しないということ、及び、照明が不要であり、3次元データが2次元画像に比べて、奥行き情報を持ち、詳細な立体形状情報を持っているため、安定的と考えるためである。

取り込んだ3次元データには顔データ以外に衣服、髪などが含まれるが、これらはデータ取得時の状態によってまちまちで、非常に変化しやすいためテンプレートに含めることができない。そのため、ここでは顔のみを抽出する前処理を行う。

また、認証対象の顔の3Dデータに対しても、同じ手法により顔部分を抽出する。その際、以下の顔である判定条件を用いる。

あるラベルが顔である判定条件

適当な顔データと2.3節の評価値を利用してテンプレートマッチングを行い、合致率(2.3.3項を参照)が30%を超えるものの中で最も合致率が高いラベルと顔とする。

2.2.1 顔領域の切り出し

人の顔の3次元データを取得した場合、顔は胸や肩等ほかの体の部位より上の位置にある。また奥行き方向ではほかの部位より手前(機器側に近い場所)に存在することが多い。そこで顔データをポリゴン単位で切り出すためにY軸(上下方向)およびZ軸(奥行き)に対して適当な閾値を設け、閾値を超えたポリゴンを顔データとして残す。

閾値を適用する手順を以下に示す。

1. DXF形式に変換した3次元データを読み込む。
2. Y値、Z値の2つに対して、適当な閾値を設定する。
3. ポリゴンを構成する4つの頂点全てが閾値を上回れば、閾値を満たしたポリゴンとする。
4. 全てのポリゴンに対して判定処理を繰り返す。
5. 顔のみが抽出されているのを確認できればテンプレートとして保存。

上記の手順を踏むプログラムを作成し、任意の閾値を設定した例を以下に示す。

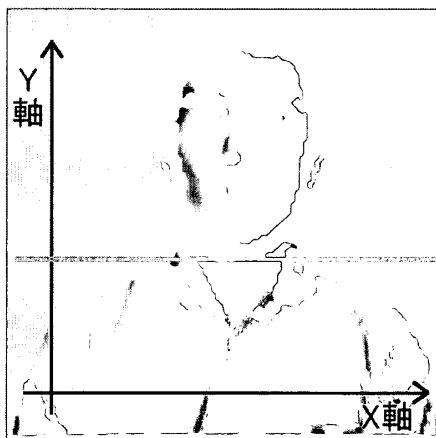


図3: Y値に対しての閾値

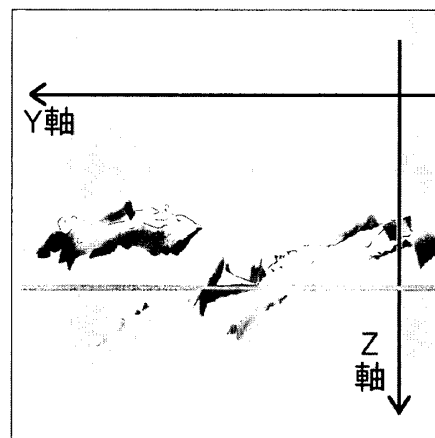


図4: Z値に対しての閾値

多くの場合、うまく顔のテンプレートを作成することができる。しかし、長髪の場合などでは、この閾値を使う手法のみでは顔以外のものを完全に除外することができないことがある。

2.2.2 ラベリングによるパーツの分離

他の部位と顔が複数のポリゴン集合に分割されているという状況のもとで、顔データのみを取り出したい場合は処理にラベリングを利用する。特に顎から首にかけてポリゴンの分かれ目があるなど、顔データが独立したポリゴン集合を形成している場合（すなわちこのポリゴン集合 i に属するポリゴンがほかのポリゴン集合の中のいずれのポリゴンとも頂点を共有していないとき）に非常に有効である。

入力されたデータを見ると図1、図3のように複数のポリゴン集合に分割されていることが非常に多い。

ラベリングでは独立した各ポリゴン集合ごとに $1, 2, \dots, i$ とラベルをつけていくことでポリゴン集合を分割する。

顔ラベルの抽出においては、現在のところ、3Dビューワ等で順次顔であることを視認する方法をとる。自動化しないのはテンプレートに顔以外が登録されるのを確実に防ぐためである。すなわち、ラベリングによって分割するところまでを自動で行い、テンプレート登録は手動で行う。

2.2.3 髪を考慮した後処理

上述した方法で作成したテンプレート画像には髪部分も含まれている。これは髪と顔の部分が分離していないからで、ラベリングの際に同じラベルが振り分けられる。

しかし、形状がすぐに変化する髪をテンプレートに登録するのは不適切なため、3Dビューワで確認した際、髪が認められれば髪部分を削除して登録することとする。

削除作業には閾値によって3次元データを切り出すプログラムに手を加えたものを利用する。任意の閾値を設定し、1つ1つテンプレートごとに髪部分の削除作業を行った。

2.3 認識用の評価規準の設定

テンプレートマッチングの評価規準としては、入力データのポリゴンの重心点よりテンプレートのポリゴン面へ法線ベクトルを伸ばし、到達した点までの2乗距離の総和を用いる。次節以降で詳しい計算手順を説明し、ここでは要点のみを記載する。

テンプレートの総ポリゴン数を n とし、入力データ側の総ポリゴン数を m としたときテンプレート側のポリゴン i の張る平面から入力データ側ポリゴン j の重心点 P_j までの法線ベクトルの長さ l_{ij} を考える。入力データ側のポリゴン点 P_j から下ろした法線ベクトルがテンプレートのポリゴン i を構成する複数の頂点の範囲内に交点を持っている場合をポリゴン i とポリゴン j の間に対応があると定義する。

ポリゴン i とポリゴン j の間に対応がないとき、距離 l_{ij} を破棄し、距離が求まっていないものとする。このとき、ポリゴン i と対応のあるポリゴン j の重心点 P_j が複数存在する可能性がある。その場合、対応のあるポリゴンの総数を k 、その中で最短な距離を l_i とし、

$$l_i = \min_{j=0,1,\dots,k} l_{ij} \quad (1)$$

で l_i を求める。テンプレート側のポリゴン全てについて求まった距離 l_i の2乗距離の総和 L は

$$L = \sum_{i=1}^n l_i^2 \quad \text{制約条件: } -10 < l_i < 10 \quad (2)$$

で求めることができる。制約条件 $-10 < l_i < 10$ は外れ値を除外することによるロバスト化[2]のため付加した条件である。

法線ベクトルの長さを利用することでテンプレートと入力データの間の対応するポリゴンを特定し、テンプレートとの誤差を測定する。

テンプレート側のポリゴン i と対応する入力側ポリゴン点 $j(j=0,1,2,\dots,k)$ が全くないときもあり、その場合、距離 l_i を求めることができないのでポリゴン i は対応点を持たないポリゴンとしてリジェクトする。ポリゴン i のもつ距離 l_i が制約条件を満たさない場合もリジェクトする。

距離 l_i を求めることができたポリゴン i の数 n_i をテンプレート側ポリゴンの総数 n で割ったものを合致率と定義する。合致率が高ければ高いほど本人の可能性が上がると予想される。

合致したポリゴンの2乗距離の総和だけを評価に利用すれば合致率が低い他人をも本人と誤認する可能性が高い。そのため評価基準 h を

$$h = \frac{nL}{n_i} \quad (3)$$

と定める。これは、距離が求まった n_i 個のポリゴンの2乗距離の総和を元に、リジェクトされた n_r 個のポリゴンについても同様に距離が求まった場合を想定した評価値である。

2.3.1 点と面の距離

VIVID 300よりDXF形式へエクスポートされた3次元データは1ポリゴンあたり4つの頂点で構成されている。しかし1つのポリゴンを構成する4つの頂点が全て同一平面上にあるとは限らない。そのため、4点の重心を用いた場合、その重心はポリゴンの平面上に存在するとは限らない。そこで、本論文では、点と面との距離を求める際に、計算時間の短縮及び、ポリゴンの平面上に存在する点を利用するという目的のために、平面を求めるテンプレート側のポリゴンを2つに分割する。その際、4つの頂点のうち最初の3点の重心をそのポリゴンを代表する点として扱うこととする。

3頂点をそれぞれ $p_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $p_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $p_3(x_3, y_3, z_3)$ としたとき、重心 P は

$$P\left(\frac{x_1+x_2+x_3}{3}, \frac{y_1+y_2+y_3}{3}, \frac{z_1+z_2+z_3}{3}\right) \quad (4)$$

となる。また、テンプレートのポリゴン面の平面式は

$$ax+by+cz+d=0 \quad (5)$$

となる。ここで a, b, c は平面の法線ベクトルである。

平面を構成する3頂点を $T_1(x_1, y_1, z_1), T_2(x_2, y_2, z_2), T_3(x_3, y_3, z_3)$ としたとき、平面は以下のように表される。

$$a'x + b'y + c'z + d' = 0 \quad (6)$$

ここで a', b', c' は

$$\begin{aligned} a' &= (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (z_2 - z_1)(y_3 - y_1) \\ b' &= (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (x_2 - x_1)(z_3 - z_1) \\ c' &= (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_1) \\ d' &= -(x_1 \cdot a' + y_1 \cdot b' + z_1 \cdot c') \end{aligned} \quad (7)$$

この平面式に正規化を施すため、 a, b, c, d を以下の方程式により求める。

$$\begin{aligned} a &= \frac{a'}{a'^2 + b'^2 + c'^2} \\ b &= \frac{b'}{a'^2 + b'^2 + c'^2} \\ c &= \frac{c'}{a'^2 + b'^2 + c'^2} \\ d &= -(x_1 \cdot a + y_1 \cdot b + z_1 \cdot c) \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、 $a'^2 + b'^2 + c'^2 \neq 0$ とする。点 $P(x_1, y_1, z_1)$ と平面 $ax + by + cz + d = 0$ の距離 l は以下の方程式によって求まる。

$$l = \frac{|ax_1 + by_1 + cz_1 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (9)$$

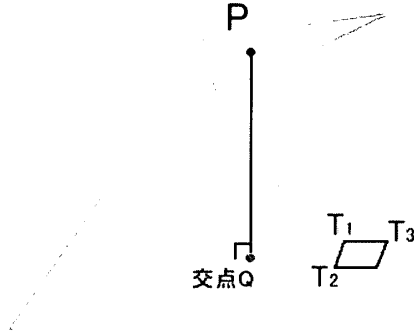
以上で距離 l が求まったが、ここで問題なのは点 P から下ろした法線ベクトルが必ずしもポリゴンを構成する3点の範囲内に入るとは限らないことにある（図5を参照）。

むしろ、点 P からの法線ベクトルがポリゴンの範囲内に入ることのほうがまれである。点 P からの法線ベクトルがポリゴンの範囲の外に入らなかったとすれば、その法線ベクトルの距離 l は最初の重心点とポリゴン間の距離を測ろうという意図と異なる結果になってしまう。

2.3.2 平面と法線ベクトルの交点の確認

問題の解決方法として平面と法線ベクトルの交点 Q を算出し[12]、その点 Q がポリゴンの範囲内であるかどうかを確認する。範囲外であった場合は重心点 P とポリゴン面が対応するといえないため、求まった距離を破棄する。

点を $P(x_1, y_1, z_1)$ 、平面を $ax + by + cz + d = 0$ とすると、交点 $Q(x_q, y_q, z_q)$ を求める方程式は

図5: 交点 Q がポリゴンの範囲内に入らない例

$$\begin{pmatrix} x_q \\ y_q \\ z_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \pm a \cdot \frac{|ax_1 + by_1 + cz_1 + d|}{a^2 + b^2 + c^2} \\ y_1 \pm b \cdot \frac{|ax_1 + by_1 + cz_1 + d|}{a^2 + b^2 + c^2} \\ z_1 \pm c \cdot \frac{|ax_1 + by_1 + cz_1 + d|}{a^2 + b^2 + c^2} \end{pmatrix} \quad (10)$$

となる。ただし、複号については

$$\text{符号} = \begin{cases} +, & ax_1 + by_1 + cz_1 + d \geq 0 \\ -, & ax_1 + by_1 + cz_1 + d < 0 \end{cases} \quad (11)$$

である。

この交点 Q は当然、ポリゴンを構成する3頂点が張る平面上に存在する。そこで交点 Q が、ポリゴンを構成する3点 T_1, T_2, T_3 を含む、辺が軸に平行な最小の直方体の中に存在すれば、3頂点 T_1, T_2, T_3 からなる3角形の範囲中に点 Q が存在していると判断する。

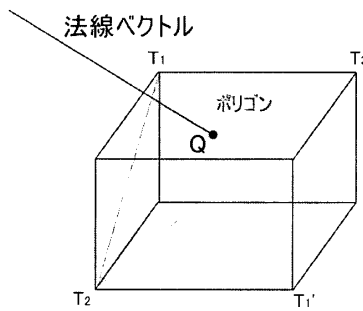
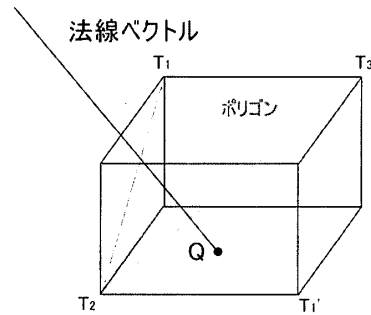
図6: $\Delta T_1 T_2 T_3$ の範囲内に入る場合

図7: ポリゴンを包含する立方体

2.3.3 ポリゴン間の対応

テンプレート側のポリゴン i の平面と入力データ側のポリゴン j の重心点 P_j との間の法線ベクトルの距離（(9)式）が求まり、その法線ベクトルと平面の交点 Q が直方体の中にあるとき、ポリゴン i とポリゴン j の間に対応があると考えることにしよう。

対応を持つ入力側のポリゴン数を k としたとき、ポリゴン i と対応をもっているポリゴン $j(j=0,1,2,\dots,k)$ の中で最も近い距離 l_i を求めるにはポリゴン i の平面上との交点 Q が(10)式を満たす範囲内に、法線ベクトルを下ろしている重心点 P_j との距離 l_{ij} 全てについて調べる必要がある。

ここで、テンプレート側のポリゴン数を n として、ポリゴン i と対応の取れた（交点 Q がポリゴンの範囲内に入っている）入力データ側のポリゴン j の重心点 P_j との間に求まった法線ベクトルの距離 l_{ij} のなかで最も短い距離 l_i は

$$l_i = \min_{j=0,1,\dots,k} l_{ij} \quad (12)$$

と示される。ただし、上記の方法で計算したとき l_{ij} が1つもない場合もある。その場合、ポリゴン i は対応をもたないとする。対応をもたないポリゴン i は距離 l_i を持たないためリジェクトされたものとして数え上げる。

総ポリゴン数を n 、距離を求めることができたポリゴン数を n_i 、リジェクトされたポリゴン数を n_r とすると、明らかに $n=n_i+n_r$ である。ポリゴンの対応がわかり、距離が求まったポリゴンの全体に対する割合を合致率と呼び、 $\frac{n_i}{n}$ で求める。

2.3.4 ロバスト化

距離 l_i の中に異常に長い法線ベクトル l_r を持つポリゴン r があった場合、距離 l_r は他のポリゴン間の距離よりも全体の評価値に強い影響をもってしまう。

突出した少数の誤差によって評価値が左右されることが起きないようにロバストな処理を加える。ここでは距離 $l_i(i=1,2,\dots,n)$ に対して任意の上限、下限を設定し、その外にあるデータを外れ値として除外することにした。これは、ロバスト推定アルゴリズムで採用される手法の1つである[2]。

本研究では制約条件を $-10 < l_i < 10$ とした。これは実際の距離で誤差 l が -10mm より 10mm の範囲であることを示す。この制約条件を満たさない距離 l_i をもつポリゴン i についてもリジェクトする。

2.4 位置合わせ

それぞれ個人で顔の位置が違うが、鼻の先は顔の部位中で隠れることが比較的少なく、最も出っ張っているといった特徴があって比較的検出容易と思われるため、本研究では鼻の先の位置に基づいた位置合わせを行う。入力データは正面を向いているものを前提としている。目や口など他の候補もあるが、3Dレーザースキャナデータを用いる際には不適當である。

2.4.1 座標変換

鼻による位置合わせを行う前提条件として人物は正面を向いているとする。位置合わせで扱うデータはラベリング、顔の抽出処理からなる前処理を行い、顔データのみが抽出されている状態である。その上で顔データのZ値が最大である頂点、つまり最も手前にある部分を鼻と判定する。

前処理を行う前のデータの段階では衣服、髪の影響が大きいため、最も手前にある部分が鼻とは限らない。しかし顔データが抽出された後ならば、「鼻は顔で一番高い部位である」という簡単な条件を用いて特定した場合でも、十分に鼻を特定できるものとする。

現在3DデジタイザVIVID 300のCCD受光部を原点とした座標系を利用している。この座標系より最もZ値の大きかった頂点を原点とした座標系へ変換する。

最もZが大きい頂点を $S(s_x, s_y, s_z)$ としたとき、顔データの持つ全ての頂点 $p_i(x_i, y_i, z_i)$, $i=1, 2, \dots, n$ に対して、変換後の頂点 $p'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$ は

$$(x'_i \ y'_i \ z'_i \ 1) = (x_i \ y_i \ z_i \ 1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_x & -s_y & -s_z & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$(i=1, 2, \dots, n)$

という操作を加えることで、 S を原点とした座標系に変換することができる[14] [15]。

2.4.2 アフィン変換

3Dデジタイザへの3次元データ入力時において、顔が横を向いている場合、アフィン変換を用いて正面を向いた状態へ回転を行う。図8は正面画像、図9はY軸回りに45度回転した3次元データである。

アフィン変換の手順は以下のとおりである。回転の中心点を顔データの重心点 P とし、顔データのポリゴン総数を n とする。顔データは顔の前面分の情報のみであるから、顔のポリゴンの重心点 P は、中心部よりも大幅に顔の表面側へ寄っている。位置合わせを行う

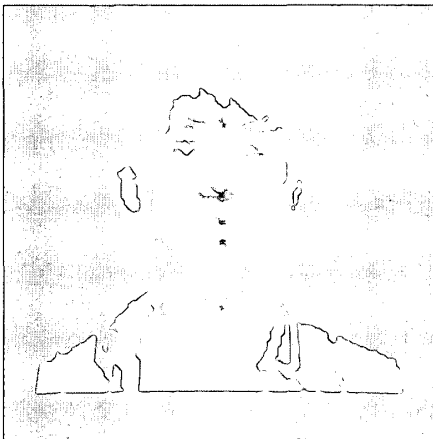


図8: 3次元データ: 正面

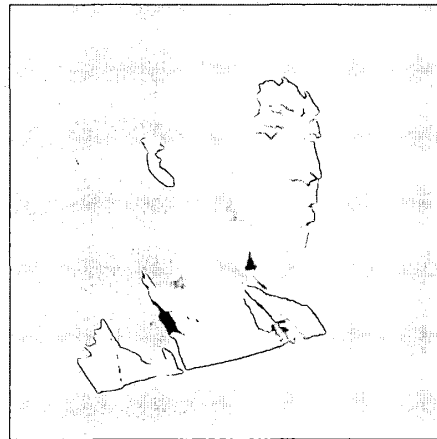


図9: 3次元データ: 45度回転

ため、重心点 P を中心に各ポリゴンを回転移動させる。まずは重心点 P を中心に回転するため、平行移動による座標変換を行う。回転終了後、移動した分を平行移動して元の位置へ戻る。3次元データを重心点 P を中心として X 軸回りに回転角 θ で回転させるためのアフィン変換式は以下のとおりである ([14] [15])。

Step 1 (P を原点とするための平行移動)

$$(x'_i \ y'_i \ z'_i \ 1) = (x_i \ y_i \ z_i \ 1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -P_x & -P_y & -P_z & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$(i=1,2,\dots,n)$

Step 2 (X 軸回りに θ 回転)

$$(x''_i \ y''_i \ z''_i \ 1) = (x'_i \ y'_i \ z'_i \ 1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Step 3 (平行移動を行い、元の座標に戻す)

$$(x'''_i \ y'''_i \ z'''_i \ 1) = (x''_i \ y''_i \ z''_i \ 1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ +P_x & +P_y & +P_z & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

Y 軸回り、 Z 軸回りの変換式は X 軸回りの変換行列

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

をそれぞれ、以下のように置き換えることで表される。

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad R_z = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

これら X 軸、 Y 軸、 Z 軸回りのアフィン変換を利用して顔データの回転を行う。

3 認証実験

前章で述べた手法によるマッチング性能評価のため、簡単な認証システムを構築し、以下のような実験を行った。

1. アルゴリズム自体の評価を行うため位置合わせによる姿勢補正を行わない基礎実験
2. より区別が付きにくい一卵性双生児の識別
3. 回転による姿勢補正を含む総合的な性能評価

以下、3種類の実験手順、実験結果詳細について詳しく述べる。

3.1 基礎実験

基本的なマッチング性能を確認するため、回転による位置合わせを使用しない場合の認証について実験を行う。位置合わせは鼻を原点とする座標変換のみを用いるため、顔の角度変化に非常に弱い。時間がたってからのデータ取得では同じような姿勢であっても誤差を含むことが見込まれる。そこで誤差を最小におさえるため、できるだけ間をあけずに連続で2回、3Dデジタイザで3次元データを取得する。はじめのデータをテンプレートと設定、2つ目のデータを未知の入力として扱った。

3.1.1 利用する3次元データ画像

実験で利用するテンプレートおよび入力データは9組である。そのうちの一部を示す。

テンプレート1から9に関しては同時に取得しているわけではないため、ポリゴン数は一定していない。おおそテンプレートのポリゴン数は900ポリゴンから1500ポリゴンの範囲にある。ポリゴン数が多いほど3次元データ化した顔の表面が滑らかと言える。また想定外の状況に対しての適応性も確認するために表情の変化を含んだものやメガネを着用したものを含めている。

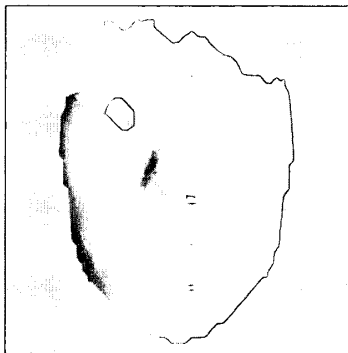


図10: テンプレート8

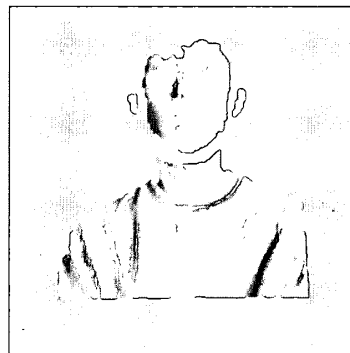


図11: 入力画像 ID: 8

3.1.2 実験結果

実験の結果を表2に示す。

行方向にID番号ごとの各テンプレートとのマッチング結果を記載している。セルのなかでは2行に分けて数値が書き込まれている。上部の数値が2.3節の(3)式で求めた評価値 h である。

評価値 h は0に近いほど誤差が少ない。更に評価値は入力データとテンプレートのポリゴン数に依存していることが確認されている。それは多数のポリゴンで構成されていれば滑らかな表面を構成していることになり、法線ベクトルが短くて済むからである。ポリゴンが疎であると、顔を構成しているポリゴンが少ないため1つのポリゴンの面積が大きくなり、法線ベクトルも滑らかな場合に比べてより多くの誤差を生む。結果的に評価値は多数のポリゴンの場合よりも大きくなる。ポリゴン数以外の条件が同じであるとすれば、ポリゴンが多ければ評価値は小さくなるが、粗ければ誤差を多く含むため評価値は大きくなる。そのため、異なるポリゴン数の入力データ間では値の相互比較は行えない。

下部の数値が2.3.3項で示した合致率(%)である。合致率が高ければ高いほど本人の可能性が高いと考える。

例として表1を使って表の見方を説明する。

表1: テンプレートマッチングの結果例

個人ID	テンプレート番号		
	1	2	3
1	31856	38836	15260
	75	56	81
2	25162	5584	18336
	55	73	70
3	23918	21924	2571
	56	55	91

この表1では1番のIDを持つ人の入力データと3番のテンプレートとの間の評価値が最も小さくなってしまったため、クラス分けが失敗している。

結果をみると、ID1の入力データがテンプレート3のクラスとされてしまっているが、表情の変化が伴っているからである。大きな変化が認められるデータについては、表情の変化について考慮していないため、正しいクラス分けを行うことができない。

さらに他人と誤っている例としてID6の入力データがテンプレート8のクラスであるとなっているが、ID6の入力についてもメガネの着用があるので、乱反射や誤った値を持つポリゴンの影響を受けて、正確に判断できていない。

ID1、ID6の結果をみると、鼻による位置合わせのみでは顔の向きの変化に非常に弱いといわざるを得ない。しかし角度が一致していれば誤っているID7も含め、非常に高い合致率を示している。ID7では合致率が誤認した6番テンプレートで79%、本人の7番テンプレートで89%と約10%の差が確認できる。表2より実験の想定外で行ったID1、ID6を除い

た状態変化の少ない入力データに対して、おおよそ正しいクラスにマッチングできていると考える。本手法でID7のようなミスが減らし、正答率を高めるためには評価値を求める式で合致率の重みを増すなどの改良が効果的である。

表2: テンプレートマッチングの結果

個人ID	テンプレート番号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	31856 75	38836 56	15260 81	22538 83	36814 57	28633 60	25600 52	22792 79	25985 72
2	25162 55	5584 73	18336 70	19482 70	34244 55	17504 75	11507 79	15345 68	28982 46
3	23918 56	21924 55	2571 91	12974 67	47412 48	21633 52	17190 52	14314 76	31708 54
4	20557 69	26083 63	15380 78	1714 89	27896 53	21209 68	19904 64	18965 74	43615 65
5	17266 81	32488 84	24060 81	15819 85	2038 95	15880 90	23147 84	8418 90	26048 84
6	25407 62	22873 64	21900 68	17075 71	19953 57	21112 77	14508 68	12622 68	29023 60
7	19200 60	23892 56	18029 55	21801 68	39141 54	15750 79	19726 89	15618 61	25400 46
8	13334 68	20080 69	19232 85	14819 80	9333 59	15751 82	15160 66	3068 94	25814 72
9	39697 70	28966 47	18015 64	21769 64	37201 64	17565 76	20417 42	20757 75	7443 96

3.2 一卵性双生児

双子、特に一卵性双生児の区別は、人間にとっても難しい。そこで本研究のアルゴリズムで双子の区別がつくのかどうか実験を行った。3.1節の実験結果で本手法は姿勢、状態の変化に弱いことが確認できている。そのため、特に顔の形状に違いが少ないと予想される双子の区別には、誤差のもととなる姿勢の変化が起きないように努める。

より正確な測定をおこなうため、入力時の姿勢等の条件を厳しくする。まず対象者の姿勢の一定化を考える。本実験では3Dデジタイザのカラーデータ用CCD部を対象者の注視点と定めて、対象者の視点を固定することで顔の向きのぶれを出来るだけ防ぐ。さらに椅子の位置は前節の実験で0.8～1.2mの範囲であったが、本節では3次元デジタイザと椅子との距離を0.8mに固定している。椅子の位置を固定することで顔データのポリゴンの数がほぼ一定になるとともに、1.2mの位置に椅子を置いた場合より取得できるポリゴン数が増えるため、3次元データの精度が良くなる。機器の性質上、対象者が3次元デジタイザに

対して、より遠くに座った場合、距離の影響を受けて顔を構成するポリゴンが減ってしまう。そこで、ポリゴン数の粗密によって法線ベクトルに誤差が入ることで結果に影響を及ぼさないようにした。

図12で線で囲っている部分が注視点となるCCDカメラの位置である。

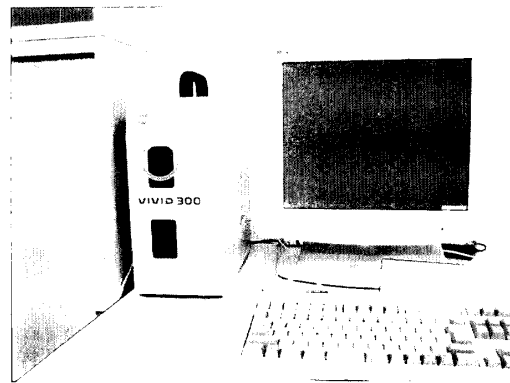


図12: 注視点の位置

3.2.1 利用する3次元データ画像

実験で利用するテンプレートは2組、入力データは6組である。

テンプレートは図13、図14の2組である。ポリゴン数はどちらも1500ポリゴン程度である。入力データについてはテンプレート取得後すぐに、姿勢を変えないまま連続して取得したもの2組や、取得したあとに一度立ってもらい、再度座ってからデータを取得しているもの4組などを含む。ただし、注視点は変わらない。

3.2.2 実験結果

実験の結果を表3に示す。双子のため、合致率が双方共に高くなっているが、その中でも間違えることなく、非常によい精度でクラス分けがなされているのが確認できる。

座りなおした(b)、(c)の場合は(a)に比べて合致率が落ちているものの、誤判定には至っていないため、問題ないを考える。データ取得時に一定の条件を付加した場合には困難と予想された双子の区別もできる精度が得られる。

3.3 姿勢補正を含む認証実験

本実験では、入力時の姿勢を緩和できるように姿勢補正も検討する。姿勢の補正を行うことで、どの程度の姿勢変化まで正しく認識できるのか、またどの程度本アルゴリズムに精度低下などの影響を与えるかを確認する。

顔の向きや姿勢を補正するため、回転による位置合わせを用いる。探索角度はX軸周りで-5度から5度、Y軸周りで-15度から15度、Z軸周りで-5度から5度の範囲を1度刻みで全探索を行う。テンプレートごとに姿勢補正を行う必要があるため、全探索は入力データごとにテンプレートの数だけ繰り返す必要がある。そのため入力データとテンプレートが増えるにつれて姿勢補正は膨大な処理となってしまう。



図 13: 写真データ 10



図 14: 写真データ 11

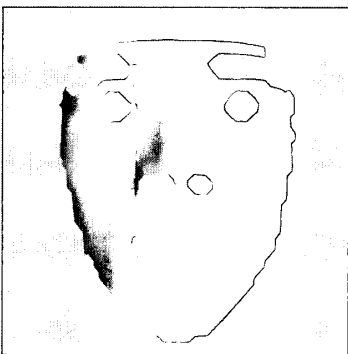


図 15: テンプレート 10

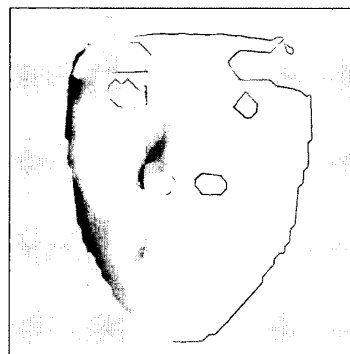


図 16: テンプレート 11

表 3: 双子のテンプレートマッチング

個人 ID	テンプレート番号	
	1	2
10(a)	1882 93	21570 86
10(b)	7211 89	14678 82
10(c)	1806 81	21834 77
11(a)	18498 84	199 99
11(b)	21059 82	3778 94
11(c)	23138 82	3315 94

3.3.1 テンプレート

テンプレートは3.1節および3.2節で用いたテンプレートを使用する。また入力データとして6組を追加した。

3.3.2 実験結果

補正を行ったテンプレートマッチングの実験結果を表5に示す。また、比較対象として補正を行わなかった場合の結果を表4に示す。

表4と補正後の表5を比較するとID2(b)とID6、およびID7のクラス分けが適切に行われていることが確認できる。

特にID6はメガネを着用している。しかし、位置合わせを適切に行った場合は正しいクラス分けが実現しており、姿勢の補正を行わなかった時と比べて誤差に強くなっている。ID1に関しては表情の変化量が大きすぎるためか、正しく判断することが出来なかったが顔の向き補正によるテンプレートマッチングの新たな誤りは起こっていない。また、補正しなかった場合に発生したID6,7のような誤判別を正しくクラス分けできていることから本手法によるテンプレートマッチングにおいて、向き補正の効果が認められる。

表4: 通常のテンプレートマッチングの結果

個人 ID	テンプレート番号										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	31856 75	38836 56	15260 81	22538 83	36814 57	28633 60	25600 52	22792 79	25985 72	53061 34	43698 47
2	25162 55	5584 73	18336 70	19482 70	34244 55	17504 75	11507 79	15345 68	28982 46	27114 48	14206 42
2b	17435 84	22125 90	9462 90	6761 91	26973 77	19396 75	17747 80	14514 92	39325 74	44842 62	40018 79
3	23918 56	21924 55	2571 91	12974 67	47412 48	21633 52	17190 52	14314 76	31708 54	52695 39	37766 52
4	20557 69	26083 63	15380 78	1714 89	27896 53	21209 68	19904 64	18965 74	43615 65	39893 34	39497 40
4b	15121 85	16837 79	14395 89	4164 94	20917 76	14374 83	15976 75	7916 91	37047 81	37600 63	15994 64
5	17266 81	32488 84	24060 81	15819 85	2038 95	15880 90	23147 84	8418 90	26048 84	23848 63	13909 64
5b	31707 65	20197 71	26116 58	24135 67	35090 66	10111 84	14971 85	17978 71	26165 48	15723 43	12392 40
6	25407 62	22873 64	21900 68	17075 71	19953 57	21112 77	14508 68	12622 68	29023 60	28105 42	14647 43
7	19200 60	23892 56	18029 55	21801 68	39141 54	15750 79	19726 89	15618 61	25400 46	39078 35	28984 34
7b	28428 73	23419 62	9845 93	21581 75	43660 64	27040 65	19456 61	18862 92	22326 91	53993 66	31705 82
8	13334 68	20080 69	19232 85	14819 80	9333 59	15751 82	15160 66	3068 94	25814 72	21630 56	12168 55
8b	35561 63	21710 76	24436 69	22941 71	31203 72	24187 81	13677 67	24433 83	34663 58	14778 72	24637 65
9	39697 70	28966 47	18015 64	21769 64	37201 64	17565 76	20417 42	20757 75	7443 96	34577 48	26560 50
9b	42627 48	35367 51	29034 43	22797 48	41648 44	10979 83	20797 59	31332 57	36714 44	33306 41	46160 37
10a	36589 61	24395 72	23939 67	25980 69	24919 66	19149 77	15107 61	20405 79	30111 61	1882 93	21570 86
10b	23034 73	22091 74	24006 72	19847 80	23435 71	10029 88	16857 65	14577 87	35891 67	7211 89	14678 82
10c	27482 62	24181 71	28439 67	24110 69	29171 67	17223 81	15909 64	21357 78	35566 56	1807 81	21834 77
11a	24469 68	18668 63	16727 82	17588 75	9965 65	18311 76	14225 56	5997 85	19059 73	18498 84	199 99
11b	29251 68	16556 63	15163 86	17524 77	14754 65	20230 73	14174 56	8230 85	21183 71	23138 82	3315 94
11c	31468 64	14206 62	14076 85	18981 69	14536 59	21141 69	12549 53	8509 84	20641 64	21863 82	3801 94

表5: 姿勢補正を含むテンプレートマッチングの結果

個人 ID	テンプレート番号										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	23729 70	37178 63	14389 78	17056 76	32035 57	20180 70	24308 65	19475 61	19517 65	51770 44	34100 47
2	13780 66	1285 74	12745 75	11077 77	39990 57	13990 74	9312 81	11119 71	38735 50	22126 44	23015 44
2(b)	8376 83	6433 91	15709 75	7447 91	17579 71	13688 81	10620 83	15026 88	29177 71	36747 66	17945 75
3	11560 54	14473 54	2027 87	16823 67	31845 49	17820 65	13792 56	4587 76	23878 59	39213 49	17942 51
4	8177 68	16774 65	18210 79	1381 87	27376 55	17734 70	16604 74	18405 65	25872 56	39893 34	31656 43
4(b)	9559 84	15597 80	13628 90	3449 94	17281 78	6532 91	15024 73	7983 93	23342 64	15673 65	13565 63
5	16276 79	23333 76	17214 89	17427 77	1711 87	11083 90	15783 81	4524 92	17763 87	29343 63	23192 63
5(b)	12738 67	17875 69	24108 64	12858 76	21899 65	6791 83	10388 87	10694 75	35454 59	13512 45	20349 43
6	9267 61	19872 60	20138 52	15026 66	15881 57	4048 80	16843 60	8128 69	24896 57	28697 41	12793 43
7	18967 61	25277 60	14152 67	17277 67	24279 56	10414 78	9412 88	19778 60	36330 56	39078 35	32036 38
7(b)	27714 71	25021 65	10532 91	14931 68	33113 82	17867 70	17375 69	14279 90	13123 93	39167 76	24150 84
8	8980 66	17390 66	7735 92	14658 79	8596 60	7021 83	14966 64	989 94	20074 68	13987 54	16253 55
8(b)	13486 71	16604 75	25834 74	16275 81	9379 70	6917 84	12368 68	2819 88	17906 77	9771 70	17413 66
9(a)	27363 57	29347 47	15521 74	18973 62	21764 66	14208 70	28413 48	12655 80	1024 90	42235 49	18984 57
9(b)	27999 59	28851 54	22607 47	24990 60	25932 56	5355 84	16845 62	20353 68	25780 55	15679 45	24676 44
10(a)	17917 70	17486 72	19446 81	18214 77	17296 70	11062 84	14661 62	6384 88	20153 66	895 89	8669 86
10(b)	12764 74	14702 75	22703 67	10153 84	22222 71	9554 89	14116 64	9893 90	17552 61	2024 88	10867 84
10(c)	17942 71	15337 72	19826 77	14131 78	17531 68	10982 84	15018 63	8568 87	19747 58	1460 81	13056 82
11(a)	14890 65	11962 60	12238 86	17469 69	8313 65	11339 81	16472 57	4790 85	15788 75	8101 81	199 99
11(b)	10249 59	13430 60	8451 88	15683 65	7976 60	9324 73	17068 54	4967 82	16114 56	5451 77	1009 92
11(c)	18031 66	14894 63	12425 86	15548 74	7660 65	7853 81	15105 57	5973 85	16444 63	9768 82	1798 91

4 おわりに

本研究では単純なポリゴンのみを用いた3次元データの顔認証システムについて性能評価を行った。実験の結果、機器に対して顔がほぼ正面を向いていれば正しく本人と認識でき、注視点など入力時の条件を整えれば人ですら難しい一卵性双生児の判断も可能であった。しかし、顔の表情変化やメガネなどの障害物のために、3Dデジタイザが顔の表面を正しくポリゴン化できなかった場合、今回用いた法線ベクトルによって評価を行うアルゴリズムでは対応しきれず、誤ったクラス分けを行ってしまうことも起こる。

このことから本手法は表情変化、メガネなどの障害物に対して、うまく検知できるようにアルゴリズムの改良の余地があるものの、認証システムとしては基本的な機能を備えており、良好な精度を持っていると考える。

謝辞

顔の3Dデータをご提供いただいた原田理矢・達矢両氏、および多くの方々に多大な感謝の意を表します。本研究の一部は、オープンリサーチセンター整備事業の補助を受けて行われた。

参考文献

- [1] <http://www.autodesk.com/>
- [2] P. J. Huber, *Robust Statistics*, Wiley-Interscience, 2003.
- [3] Samir Nanavati, Michael Thieme, Raj Nanavati, *Biometrics: Identity Verification in a Networked World*, John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [4] John D. Jr. Woodward, Nicholas M. Orlans, Peter T. Higgins, *Biometrics*, McGraw-Hill, 2002.
- [5] 日本自動認識システム協会編, これでわかったバイオメトリクス, オーム社, 2001.
- [6] 瀬戸洋一編著, ユビキタス時代の情報セキュリティ技術, 日本工業出版, 2003.
- [7] 菅知之, 本人の全体像とバイオメトリクスの位置付け, 情報処理, 第40巻 第12号, pp. 1073–1077, 1999.
- [8] 鷲見和彦, 顔のバイオメトリクス, 計測と制御, 第43巻 第7号, pp. 554–557, 2004.
- [9] 寺田賢治, 山口順一, 中島真人, 3次元センサを用いた人の顔の自動識別システム, 計測自動制御学会論文集, 第32巻, 第1号, pp. 122–127, 1996.
- [10] 山口順一, セキュリティにおける光計測, 計測と制御, 第39巻 第4号, pp. 273–278, 2000.
- [11] 吉沢徹, 光によるヒトの3次元形状計測, 計測と制御, 第39巻 第4号, pp. 267–272, 2000.
- [12] 谷尻豊寿, 最新 画像処理入門, 技術評論社, 1996.
- [13] @nifty 建築フォーラム, URL http://forum.nifty.com/farchi/file/fai_05.htm
- [14] 千葉則茂, 土井章男, 3次元CGの基礎と応用, サイエンス社, 1997.
- [15] 群山彬, 原正雄, 峯崎俊哉, CGのための線形代数, 森北出版, 2000.